ДИАГНОСТИКА БАКТЕРИЙ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ ФАБРИ-ПЕРО В КРЕМНИЕВЫХ НАНОСТРУКТУРАХ РАЗЛИЧНОЙ МОРФОЛОГИЙ

М. Ван^{1*}, П. А. Рачишена¹, Д. А. Назаровская¹, П. А. Домнин², И. И. Циняйкин¹, С.А. Ермолаева², Л. А. Осминкина¹, К. А. Гончар¹

¹Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова 119991, Российская Федерация, Москва, Ленинские горы, д. 1 ²Национальный исследовательский центр эпидемиологии и микробиологии им. Н. Ф. Гамалеи 123098, Российская Федерация, Москва, ул.Гамалеи, д. 18 *E-mail: van.m17@physics.msu.ru

В представленной работе пористые наноструктуры кремния различной морфологии исследовали в качестве интерференционных ИК -сенсоров для диагностики бактерий. На примере использования бактерий *E. Coli* показано, что морфология пористых структур существенно влияет на эффективность адсорбции бактерий и сенсорный отклик измеряемого оптического сигнала.

Оптические биосенсоры имеют значительные преимущества перед другими аналитическими методами благодаря хорошей чувствительности, удобству и простоте использования, воспроизводимости и надежности. Наиболее распространенные оптические датчики основаны на эффектах интерференции света в тонких слоях кремниевых наноструктур, таких как пористый кремний (ПК) [1] или кремниевые нанонити (КНН) [2]. Принцип работы такого датчика заключается в том, что освещение тонкого слоя кремниевых наноструктур белым светом приводит к отражению света от верхней и нижней границы наноструктур, создавая интерференцию Фабри-Перо, где частота интерференции определяется эффективной оптической толщиной слоя кремниевых наноструктур [1]. Изменение эффективного показателя преломления кремниевых наноструктур после адсорбции биологических молекул и клеток проявляется в смещении интерференционных полос и/или изменении их амплитуды [1–3].

В работе были исследованы три различные наноструктуры:

 ПК, полученный электрохимическим (ЭХ) травлением пластин кристаллического кремния (c-Si) в растворе НF (48%) : C₂H₅OH, взятых в объемном соотношении 3:1, при плотности тока травления 385 мА/см² в течении 30 секунд.

2) ПК, полученный жертвенным ЭХ травлением пластин с-Si. Для этого сначала происходило ЭХ травление пластин с-Si ЭХ травление в растворе HF (48%) : C_2H_5OH , взятых в объемном соотношении 3:1, при плотности тока травления 300 мA/см² в течении 30 секунд. Далее образец погружался в раствор NaOH (0,01 M), в котором полученная пористая структура растворялась, оставляя затравки пор на поверхности с-Si. После чего снова происходило ЭХ травление при тех же условиях. Данный метод за счёт первого жертвенного слоя позволяет получать раскрытые поры на поверхности получаемой пленки ПК.

3) Пористые КНН, полученные методом металл-стимулированного химического травления пластин с-Si p-типа проводимости с кристаллографической ориентацией (100) и удельным сопротивлением 1–5 мОм см. Пластину с-Si выдерживали в 5 М НF для удаления SiO₂ с ее поверхности. В начале синтеза наночастицы серебра наносились на поверхность с-Si путем погружения пластины в раствор AgNO₃ (0,02 M) : HF (5 M), взятых в объемном соотношении 1:1. , в течение 15 секунд. На втором этапе MCXT пластина с-Si, покрытая наночастицами серебра, погружалась в раствор H₂O₂ (30%) : HF (5 M), взятый в объемном соотношении 1:10, на 20 минут. Травление происходило на участках, покрытых наночастицами серебра, которые, проваливаясь вглубь с-Si, образовывали нитевидные структуры КНН. Затем для удаления серебряных наночастиц образец помещали в HNO₃ на 5 мин.

СЭМ микрофотографии кремниевых наноструктур различной морфологии после адсорбции *E. Coli*. представлены на рисунке 1.



Рис. 1. СЭМ микрофотографии кремниевых наноструктур различной морфологии после адсорбции *E. Coli*.

С помощью ИК Фурье-спектрометра фирмы Bruker IFS 66v/S в среднем ИК диапазоне измерялись спектры отражения ПК без и с *E. Coli* в концентрации 10⁶ КОЕ/мл. Полученные спектры обрабатывались с помощью быстрого Фурье преобразования и определялась эффективная оптическая толщина кремниевых наноструктур (EOT=2Ln_{eff}). Для ПК обнаружено уменьшение ЕОТ подле адсорбции бактерий, что можно объяснить маленьким размером пор пленок ПК, из-за чего бактерии осаждаются только на поверхности сенсорного элемента. В результате, с одной стороны, увеличивается толщина измеряемого слоя (L), в котором наблюдаются интерференционные полосы, но с другой стороны, neff этого слоя уменьшается, так как верхняя часть слоя теперь содержит только воздух и бактерии, что в совокупности приводит к снижению ЕОТ. Для КНН же обнаружено увеличение ЕОТ после адсорбции бактерий, что можно объяснить увеличением neff, поскольку бактерии могут частично адсорбироваться в порах образца.

В результате в ходе проделанной работы показана возможность диагностики бактерий с помощью интерференции Фабри-Перо в кремниевых наноструктурах и различия в изменении ЕОТ при детектировании бактерий связанные с различной морфологией структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-72-10062, <u>https://rscf.ru/project/22-72-10062/</u>.

Список литературы

1. A. Jane, R. Dronov, A. Hodges, et.al. Porous silicon biosensors on the advance // Trends in biotech., vol. 27(4), pp. 230-239, 2009.

2. K.A. Gonchar, S.N. Agafilushkina, D.V. Moiseev, et.al. H1N1 influenza virus interaction with a porous layer of silicon nanowires // Mater. Res. Express, vol. 7, p. 035002, 2020.

3. M.B. Gongalsky, A.A. Koval, S.N. Schevchenko, et.al. Double Etched Porous Silicon Films for Improved Optical Sensing of Bacteria // J. Electr. Soc., 164(12), p. B581, 2017.